

личаются от инженерного расчета в большей степени, что приводит к необходимости введения дополнительных поправок, но не делает их менее востребованными при инженерном анализе теплофизических процессов.

Список использованных источников

1. Денисов М.А. Учебно-справочный комплекс тепловых расчетов в пакете ANSYS Multiphysics для проектирования в металлургии // Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2013. – С. 93–94.
2. Денисов М.А. Разработка учебно-справочного комплекса проектного моделирования в пакете ANSYS Workbench // Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2013. – С. 95–96.
3. Королев В.Н. Тепломассообмен: учебное пособие / В.Н. Королев. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. – 300 с.

УДК 669.162.263

В. С. Швыдкий¹, А. Р. Фатхутдинов¹, Н. А. Спири¹, С. Е. Шихов²

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

² ПМК ОАО «Уралэлектротяжеломет», г. Верхняя Пышма, Россия

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ РАБОТОЙ ШАХТНОЙ ПЕЧИ

Аннотация

В данной работе рассмотрены разработка и внедрение системы автоматического управления тепловой работой шахтной печи для переплавки медных катодов на основе математической модели. Статья подробно описывает актуальность и предпосылки для разработки указанной информационной системы, а также этапы ее внедрения в действующее производство. Анализ критериев работы системы, выполненный совместно с технологами ПМК АО «Уралэлектротяжеломет», показывает улучшение показателей энергоэффективности работы оборудования.

Ключевые слова: шахтная печь, расплав, математическая модель, автоматическое управление, ПИД-регулятор.

Abstract

In this work the design and implementation of the automatic control system thermal operation of the shaft furnace for melting copper cathodes based on a mathematical model. The article describes the relevance and prerequisites for the development of this information system, as well as the stages of its implementation into existing production. The analysis of the system criteria, made together with technologists of PMK "Uralelectromet" indicates improvement in energy efficiency of the equipment.

Keywords: shaft furnace, melt, mathematical model, automatic control, PID controller.

Шахтная печь Asarco – слоевой агрегат, предназначенный для переплавки медных катодов и входящий в состав линии по производству медной катанки ЗАО «СП Катур-Инвест» (с 2016 года – ПМК ОАО «Уралэлектротяжеломет»).

Печь представляет собой шахту, футерованную огнеупорным карбидокремниевым кирпичом (рис. 1). Загрузка материала осуществляется сверху через загрузочное окно при

помощи скипового подъемника, удаление расплава происходит по наклонной лещади через выпускную летку. Нагрев и плавление металла в печи выполняется за счет сгорания природного газа в трех рядах радиально расположенных газогорелочных устройств. Далее расплав поступает через соединительный желоб в печь-миксер, а из него по литейному желобу в литейную ванну и далее в литейную машину.

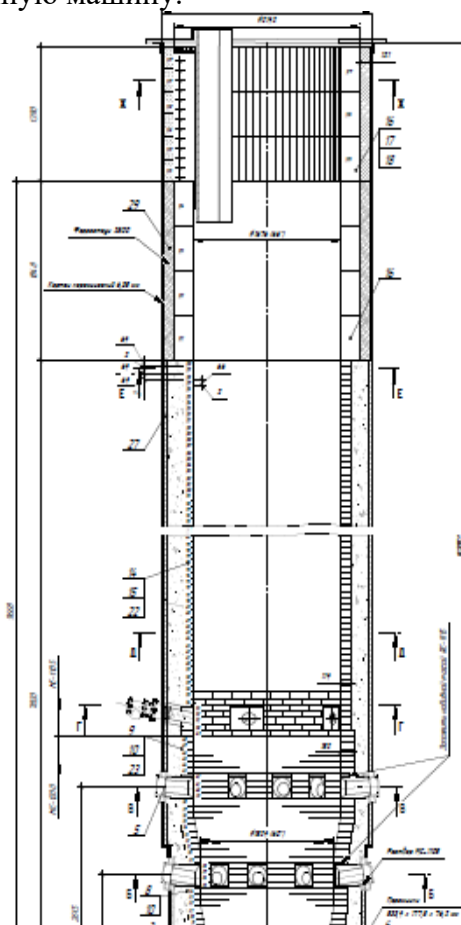


Рис. 1. Шахтная печь Asarco

Управление тепловой работой печи с момента запуска в эксплуатацию осуществлялось вручную оператором по показателям производительности, температуры расплава и собственном экспертном опыте. Производительность печи определяется по положению печи-миксера, температура металла – по показаниям датчика, установленного в литейной ванне.

Ручное управление тепловой работой печи обладало рядом недостатков:

1. Качество управления целиком зависело от оператора, а именно от его опыта, дисциплины и интуиции.
2. Ошибочные или несвоевременные действия оператора приводили к серьезным колебаниям производительности, вплоть до аварийных и предаварийных ситуаций, связанных либо с избытком расплава, либо с его недостаточностью.
3. Нестабильная тепловая работа печи приводила к повышенному расходу топлива и, как следствие, к понижению показателей энергоэффективности линии по производству медной катанки.
4. Значительные колебания потока расплава приводили также к колебаниям температуры расплава при литье и содержанию в нем кислорода, что негативным образом сказывалось на качестве готовой продукции.

Первая попытка автоматизировать процесс управления тепловой работой шахтной печи Asarco была предпринята в 2014 году. За основу был взят ординарный ПИД-регулятор, на вход которого подавалось рассогласование между заданным значением положения печи-миксера и текущим положением. На выходе ПИД-регулятора формировалось управляющее

воздействие в виде расхода природного газа на ряд «В» (средний ряд газогорелочных устройств печи). Расходы природного газа на ряды «А» и «С» вычислялись как расход газа на ряд «В», умноженный на коэффициенты, определяемые опытным путем.

Разработанная система, целиком опирающаяся на закон ПИД-регулирования, при опытной эксплуатации не зарекомендовала себя. Основная причина – высокое время запаздывания между управляющим воздействием (корректировка расхода газа) и изменением управляемого технологического параметра (положение печи-миксера).

В самом деле, чрезвычайно высокая инертность системы приводила к постоянному перерегулированию и, как следствие, автоколебаниям, что в совокупности с рядом неуправляемых воздействий на систему, таких как неравномерная загрузка шихтовых материалов, изменение типа шихты, случайное неудачное расположение медных катодов внутри шахты при загрузке, сводила к нулю все попытки настройки системы автоматического управления тепловой работой шахтной печи на основе ПИД-регулирования, и в автоматическом режиме показатели работы печи были хуже, чем при ручном управлении.

Негативный опыт ПИД-управления тепловой работой шахтной печи натолкнул разработчиков на мысль о том, как избежать критически высокого времени запаздывания. Если между управляющим воздействием и обратной связью проходит 30–40 мин, то для расчета рассогласования необходимо использовать не текущее значение управляемого параметра, а прогнозируемое значение, которое должно наступить при текущих управляющих воздействиях через соответствующее время запаздывания.

Таким образом, для автоматического управления тепловой работой шахтной печи требовалась математическая модель, которая, основываясь на архивных и текущих значениях параметров технологического процесса, прогнозировала бы производительность печи по металлу вперед на определенное опытным путем время запаздывания.

Теоретические основы и уравнения искомой математической модели ранее подробно описаны в [1–6]. В настоящей статье мы не будем останавливаться на теории, а перейдем непосредственно к реализации и работе автоматической системы управления тепловой работой шахтной печи Asarco.

Разработка и внедрение автоматической системы управления тепловой работой шахтной печи Asarco были произведены в IV этапа.

Этап I. Проведение технических экспериментов на действующем оборудовании и анализ архивов параметров технологического процесса. На данном этапе эмпирическим путем были определены основные коэффициенты для математической модели, а также времена запаздывания для каждого ряда газогорелочных устройств.

Этап II. Разработка дискретного аналога математической модели и его верификация вне объекта. Разработка и оптимизация алгоритма математической модели выполнялась в среде VBA. На этом этапе математическая модель была максимально упрощена без весомой потери точности расчетов. Верификация модели выполнялась путем обработки массива реальных данных, выгруженных из АСУ ТП шахтной печи в формате электронных таблиц Excel. При сравнении расчетного положения миксера и фактического были получены удовлетворительные результаты. Также выяснилось, что для минимизации неуправляемых воздействий необходима самокоррекция математической модели под фактические складывающиеся условия теплообмена в рабочем порядке печи. Самокоррекция была реализована путем сравнения прогнозируемого значения положения миксера и фактического через определенных промежутков времени с соответствующей коррекцией коэффициентов модели в заданном диапазоне.

Этап III. Программная реализация, установка и опытно-промышленная эксплуатация системы автоматического управления тепловой работой шахтной печи. Разрабатываемая информационная система была встроена в существующую АСУ ТП шахтной печи Asarco на базе ПЛК Siemens S7-400 и SCADA WinCC. Структура системы представлена на рис. 2.

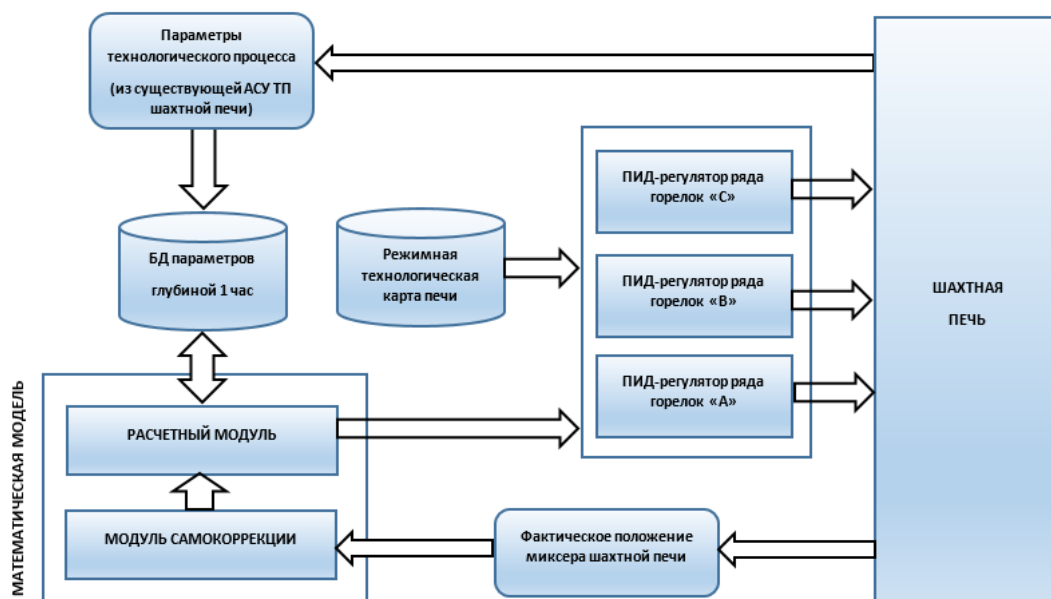


Рис. 2. Структура системы автоматического управления тепловой работой шахтной печи Asarco

Представленная система работает следующим образом. Розжиг печи и ее вывод на заданную производительность выполняется оператором в ручном режиме. После этого оператор должен проработать в более или менее стационарном режиме работы не менее 1 часа для набора статистических параметров для расчета коэффициентов модели. При этом как расчетный модуль математической модели, так и модуль самокоррекции функционируют в фоновом режиме, подстраиваясь под фактические параметры технологического процесса и соответствующие условия теплообмена в рабочем пространстве печи (температура и равномерность загрузки, тип шихты, тип подшихтовки, потери тепла на нагрев футеровки после холодного простоя и т.д.).

После перевода печи в автоматический режим работы прогнозируемые положения печи-миксера (выходы математической модели) через 5, 20 и 40 минут соответственно для рядов горелок А, В и С подаются на входы программных ПИД-регуляторов для каждого и из вышеуказанных рядов. Выходом ПИД-регуляторов является прибавка, в том числе и отрицательная, к текущему расходу природного газа на ряд горелок, который, в свою очередь, регулируется в диапазоне, определенном режимной картой печи.

Главная мнемосхема системы автоматического управления тепловой работой шахтной печи представлена на рис. 3.

Окно трендов технологических параметров системы представлено на рис. 4.

На рис. 5 представлен участок трендов положения печи-миксера в увеличенном масштабе, где хорошо просматривается процесс самокоррекции модели (серый цвет – прогноз положения печи-миксера, черный цвет – фактическое положение, красный цвет – заданное положение).

Опытно-промышленная эксплуатация системы автоматического управления тепловой работой происходила в течение 5-ти месяцев и завершилась приемкой системы в промышленную эксплуатацию, о чем был подписан соответствующий акт.

Этап IV. Промышленная эксплуатация и анализ работы. После приемки системы в промышленную эксплуатацию работы по дальнейшей настройке системы не прекратились. Набранный массив статистических данных позволял провести более глубокий анализ работы системы и откорректировать параметры для достижения оптимальных параметров ведения технологического процесса.

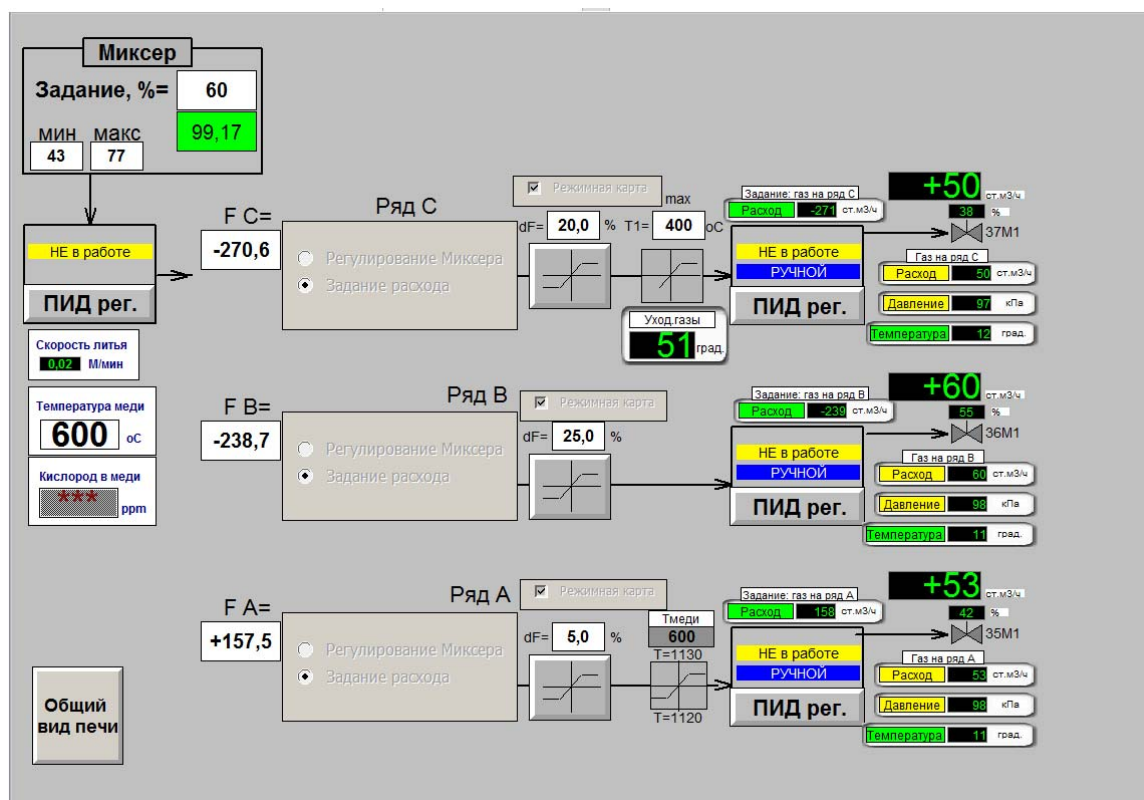


Рис. 3. Главная мнемосхема системы автоматического управления тепловой работой шахтной печи



Рис. 4. Окно трендов технологических параметров

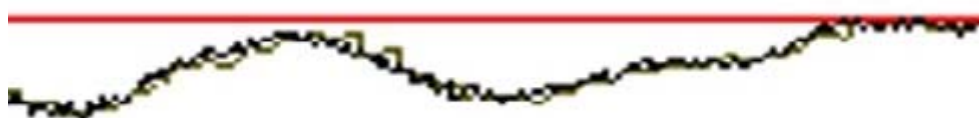


Рис. 5. Тренды положения печи-миксера

Для оценки эффективности работы системы автоматического управления тепловой работы шахтной печи технологами ПМК АО «Уралэлектромедь» были выбраны 2 основных критерия:

- удельных расход природного газа на тонну готовой продукции, $\text{нм}^3/\text{т}$;
- удельное количество «зависаний» шихты, шт/т.

Справочно: «зависание» шихты – результат неравномерного плавления медных катодов, который сопровождается резким снижением производительности печи по плавлению и повышением температуры расплава. Кроме того, при «зависании» шихты увеличивается расход природного газа, и, как следствие, снижаются удельные показатели энергоэффективности линии по производству медной катанки.

Результаты сравнения средних значений приведенных выше критериев для смен со 100 %-ой работой в автоматическом режиме и смен со 100 %-ой работой в ручном режиме за 1 квартал 2017 года приведены на рис. 6.

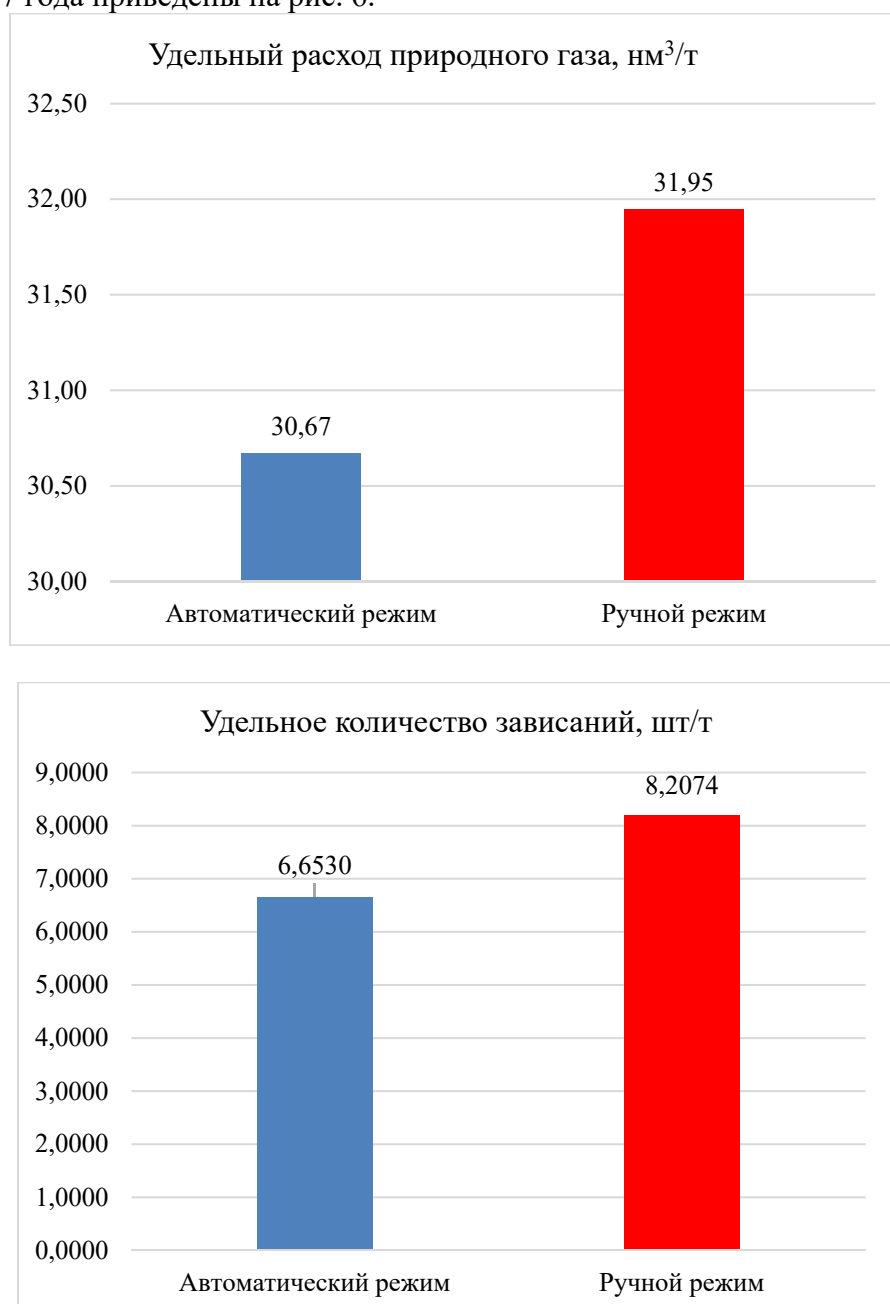


Рис. 6. Сравнение критериев эффективности работы системы автоматического управления тепловой работой шахтной печи за 1 квартал 2017

Как видно из рис. 6, в автоматическом режиме печь имеет более стабильный характер работы, сопровождающийся снижением удельного расхода топлива.

По результатам промышленной эксплуатации системы автоматического управления тепловой работой шахтной печи можно сделать следующие основные выводы:

- разработанная система позволяет вести технологический процесс плавления медных катодов в автоматическом режиме;
- автоматический режим управления тепловой работой печи позволяет получить более стабильные параметры технологического процесса, что непосредственным образом влияет на качество готовой продукции и повышает показатели энергоэффективности производства;
- имеется два основных пути для совершенствования системы: более тонкая настройка ПИД-регуляторов для различной производительности линии и различного типа шихты, а также разработка и внедрения модуля управления температурой расплава.

Список использованных источников

1. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 2 / В.С. Швыдкий, А.Р. Фатхутдинов, Е.А. Девярых, Т.О. Девярых, Н.А. Спирин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 1. – С. 19–23.
2. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 1 / В.С. Швыдкий, А.Р. Фатхутдинов, Е.А. Девярых, Т.О. Девярых, Н.А. Спирин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 8. – С. 634–638.
3. К математическому моделированию шахтных печей с плавлением материалов / В.С. Швыдкий, А.Р. Фатхутдинов, А.Н. Алексеев // В сборнике: Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016. – С. 74–85.
4. К математическому моделированию шахтных печей с плавлением материалов / В.С. Швыдкий, А.Р. Фатхутдинов, Е.А. Девярых, Т.О. Девярых, Н.А. Спирин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 6. – С. 424–430.
5. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 1 / В.С. Швыдкий, А.Р. Фатхутдинов, Е.А. Девярых, Т.О. Девярых, Н.А. Спирин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 9. – С. 634–638.
6. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 2 / В.С. Швыдкий, А.Р. Фатхутдинов, Е.А. Девярых, Т.О. Девярых, Н.А. Спирин // Известия вузов. Черная металлургия, 2017, т.60, № 1. – С. 19–23.

УДК 66-933.6, 669.013

А. Н. Шешин, Н. Б. Лошкарев

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» - ОАО «ВНИИМТ», г. Екатеринбург, Россия

СОЗДАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ №2 ЗАВОДА ИМЕНИ М.И. КАЛИНИНА

Аннотация

Одним из основных этапов проектирования системы автоматизации управления (САУ) является создание информационного обеспечения (ИО). Опыт практического созда-